© 2017 EVU

Fußgängererkennbarkeit mit Halogen, Xenon und LED: Der Streulichteffekt

Dipl.-Phys. Annika Kortmann[1]*, Dr. rer. nat. Tim Hoger[1]

[1]*Ing.-Büro Schimmelpfennig + Becke, Germany*

**e-mail: kortmann@ureko.de*

Abstract

Drivers‘ ability to detect pedestrians depends not only an the power and “range” of their headlights. Another important factor is the “light scatter”. Can pedestrians be detected more quickly with more expensive xenon an LED headlights than they can with low-cost halogen headlamps? Is it possible to bring about a significant improvement by changing the bulbs in halogen headlights? With the aim of answering these questions, light tests were carried out using an Audi A4 with halogen, xenon an LED lights and with a variety of bulbs in the halogen headlights and the results are compared with the outcome of a test involving a Series 1 BMW. Now it is possible to show whether pedestrians are easier to detect with xenon or LED systems than with halogen headlights. The results clearly demonstrate the limits of new headlight designs and the need for adaptive lighting systems.

Zusammenfassung

Die Erkennbarkeit eines Fußgängers ist für einen Pkw-Fahrer nicht nur mit der Lichtstärke und der “Reichweite” seines Scheinwerfers verknüpft. Von Bedeutung ist auch das „Streulicht“ des Scheinwerfers. Lassen sich Fußgänger mit höherpreisigen Xenon-und LED-Scheinwerfern früher erkennen, als dies mit kostengünstigen Halogenscheinwerfern der Fall ist? Ist es möglich, durch Austausch der Leuchtmittel in Halogenscheinwerfern eine wesentliche Verbesserung zu erreichen? Zur Klärung dieser Fragen wurden lichttechnische Untersuchungen mit einem Fahrzeugtyp (Audi A4) in der Halogen-, Xenon- und LED-Ausstattung durchgeführt und beim Halogenscheinwerfer verschiedene Leuchtmittel verwendet und die gewonnenen Ergebnisse aus der Untersuchung eines 1er-BMW gegenübergestellt. So lässt sich zeigen, ob Xenon- oder LED-Systeme bei der Fußgängererkennbarkeit einem Halogenscheinwerfer überlegen sind. Die gewonnenen Ergebnisse zeigen die Grenzen der neuen Scheinwerfersysteme auf und die Notwendigkeit einer adaptiven Lichtregulierung.

Einleitung

Die häufigsten Scheinwerfertypen für Abblendlicht an Pkw arbeiten heutzutage mit Halogenlicht. Gerade neure, hochpreisige Pkw werden zunehmend mit Xenon- oder LED-Licht ausgerüstet. Es wird unter anderem mit einer besseren Grundausleuchtung oder Lichtqualität geworben, was mit mehr Sicherheit im Straßenverkehr gleichgesetzt wird [1].

Der ADAC testete 2016 die LED-Lichtanlagen von sechs SUVs in den Kategorien Grundausleuchtung, Lichtqualität, Blendwirkung und Licht-Assistenzsysteme [2]. Die Untersuchungen erfolgten in einem Lichtkanal, auf einem Testgelände und bei einer Testfahrt. Beurteilt wurde zum Beispiel die Homogenität der Lichtverteilung, das heißt ein Auftreten von auffällig hellen Flecken und störenden Lichtreflexen. Das Fazit: unter anderem durch eine gute bis sehr gute „Ausleuchtung“ bietet das LED-Lichtsystem besonders im Vergleich zum Halogenlicht mehr Sicherheit.

Typische Dunkelheitsunfälle wurden mit den neuen Lichtsystemen bisher kaum analysiert. In

den letzten fünf Jahren starben pro Jahr im Schnitt rund 550 Fußgänger bei Verkehrsunfällen in Deutschland [3], davon 23 % bei Nacht [4]. Die lichttechnische Beurteilung der Unfallsituation ist einerseits für die Unfallrekonstruktion und damit für Haftungsfragen von Bedeutung. Andererseits könnten aus einem Fußgängerunfall mit halogenscheinwerferbestücktem

Pkw durch eine Alternativbetrachtung mit Xenon- oder LED-bestücktem Pkw Informationen zur Weiterentwicklung von Scheinwerfern gewonnen werden.

Wer „nur“ über ein Fahrzeug mit Halogenscheinwerfern verfügt und dieses aufrüsten möchte, der kann sich verschiedener Internetanbieter bedienen. Neben besonders hellen Glühlampen mit Straßenzulassung werden auch LED-Leuchten mit H7-Fassung angeboten. Der Hersteller Osram wirbt zum Beispiel mit seinen Night Breaker Unlimited, die optimales Licht für mehr Zeit zum Reagieren bieten sollen. In einem Glühlampentest durch den ADAC [5] wird die Lichtqualität und -intensität, die Blendung

und die Lebensdauer beurteilt. Es fehlt jedoch eine Beurteilung, ob Objekte bei Benutzung der einzelnen Lampentypen besser erkannt werden können und so dem Autofahrer tatsächlich mehr Zeit zur Reaktion bleibt.

In der Unfallrekonstruktion ist bei einem Gerichtsverfahren entscheidend, ob eine Betrachtung zu Gunsten oder zu Ungunsten des Pkw-Fahrers vorliegt, wenn von einer Standardbeleuchtung ausgegangen wird. War ein Fußgänger, der die Fahrbahn des Unfall-Pkw kreuzt, eventuell durch den Austausch der Standardglühlampe gegen eine „hellere Lampe“ für den Fahrer zu einem früheren Zeitpunkt erkennbar? Die Verwendung eines Vergleichs-Pkw mit Standardbeleuchtung bei einer lichttechnischen Untersuchung würde dann zu falschen Ergebnissen führen.

Grundlagen der lichttechnischen Untersuchung

Zur Beurteilung der Erkennbarkeit eines Fußgängers wird die Leuchtdichtedifferenz des Fußgängers relativ zum Hintergrund in [cd/m²] gemessen. Die Leuchtdichte ist die Leuchtintensität, die pro Fläche auf das Auge einwirkt. Bei der Auswertung der Sichtbarkeit wird die gemessene Leuchtdichtedifferenz der erforderlichen Schwellenleuchtdichtedifferenz von Berek [6] und Adrian et al. [7] gegenübergestellt. Bei der Schwellenleuchtdichte handelt es sich um die Leuchtdichtedifferenz eines Objekts zu seinem Hintergrund, bei der das Objekt unter Laborbedingungen von einem konzentrierten Beobachter gerade noch erkannt werden kann.

In Abhängigkeit der Objektgröße (Sehwinkel) und der Umgebungsleuchtdichte ergeben sich die in dem Bild 1 dargestellten Kurven (Bereksche Kurven). In der Realität muss der Seheindruck von sich bewegenden Objekten in kürzester Zeit verarbeitet werden, gleichzeitig wird der Fahrer durch Leuchtquellen in der Umgebung abgelenkt. Durch sogenannte Praxisfaktoren wird dies berücksichtigt. Gemäß Schmedding et al. [8] kann die vor Ort gemessene Leuchtdichtedifferenzen gegen die Fußgängerentfernung zum Pkw in einem „Soll-Ist“-(SI)-Diagramm dargestellt werden.

Dem exemplarisch in Bild 1 rechts dargestellten SI-Diagramm ist zu entnehmen, dass der Fußgänger erstmalig aus einer Entfernung von knapp 55 m erkennbar ist. In dieser Entfernung ist die gemessene Leuchtdichtedifferenz (rote Kreise) größer, als die mit dem Praxisfaktor 3 bewertete, zum Erkennen erforderliche, Leuchtdichtedifferenz (rote Linie). Eine genauere Bestimmung der Erkennbarkeitsentfernung ist aufgrund der gewählten Schrittweite von 13,9 m zwischen den Fußgängerpositionen messtechnisch nicht möglich, sondern kann nur in Verbindung mit einem kontinuierlichen Verlauf interpoliert werden.

Die Leuchtdichten an der Unfallstelle beziehungsweise Sichteindrücke lassen sich mithilfe eines Leuchtdichtemessgeräts oder einer Standardspiegelreflexkamera aufnehmen. Die Vermessung mit dem Leuchtdichtemessgerät kann nur punktweise erfolgen, sodass die Durchführung einer LTU zeitaufwendig ist. Bei

einer Dokumentation des Seheindrucks mittels einer Digitalkamera besteht hingegen das Problem der Über- oder Unterbelichtung der aufgenommenen Lichtbilder, sodass eine Fußgängererkennbarkeit aus der nachträglichen Sichtung dieser Bilder nicht abgeleitet werden kann.

Da der Aufbau einer Digitalkamera dem eines Leuchtdichtemessgerätes ähnelt, entwickelten Wüller [9] und Hoger [10] Verfahren, um die Digitalkamera bei einer LTU einsetzen zu können. Durch eine Kalibrierung der Digitalkamera kann die aufgenommene Bildhelligkeit bei gegebener Blende, Belichtungszeit und ISO-Wert einer Leuchtdichte zugeordnet werden. Die wellenlängenabhängige Helligkeitsempfindlichkeit des Auges wird bei der Kalibrierung ebenfalls berücksichtigt. Die Auswertung der aufgenommenen Lichtbilder kann dann am PC erfolgen.

Versuchsaufbau und -durchführung

Zur Beurteilung der Fußgängererkennbarkeit wurden lichttechnische Untersuchungen (LTU) durchgeführt, bei denen sich ein Fußgänger unter 90 ° zur Fahrzeuglängsachse, von links und rechts kommend, mit einer Geschwindigkeit von 5 km/h näherte. Die Geschwindigkeit des Pkw wurde mit konstant 50 km/h angenommen und die Kollision mittig an der Fronthaube berücksichtigt. Um die Positionen zwischen Fußgänger und Pkw mit verschiedenen Fahrzeugen möglichst genau reproduzieren zu können, wurde nur der Fußgänger auf das Fahrzeug zubewegt. Die Entfernungen zum Kollisionsort von Pkw und Fußgänger zeigt Tabelle 1.

	Entfernung zum Kollisionsort (s=0m) [m]	
Zeit [s]	50 km/h (Pkw)	5 km/h (Fußgänger)
-1	13,9	1,4
-2	27,8	2,8
-3	41,7	4,2
-4	55,6	5,6
-5	69,4	6,9

Tabelle 1: Positionen von Pkw/Fußgänger für die LTU

Zusätzlich zu den Sichtfotos aus dem Pkw wurde bei jeder Messreihe die Beleuchtungsstärke auf dem Boden in 10 m-Abständen in Verlängerung der Fahrzeuglängsachse bis zu einer Entfernung von 100 m bestimmt und ein Hochfoto aus rund 5 m Höhe des Scheinwerferprofils gefertigt. In jeder Messreihe wurden Sichtfotos aus dem Pkw auf den Fußgänger für die zeitlichen Abstände zwischen 5 und 1 s vor der Kollision mit einer kalibrierten Digitalkamera für je eine Fußgängerannäherung von rechts und links aufgenommen. Bild 2 und Bild 3 zeigen die Sichtaufnahmen aus den Audi A4-Fahrzeugen mit einem Standard-H7-, Xenon- und LED-Scheinwerfersystem im Zeitraum zwischen 4 und 1 s vor der Kollision bei einer Fußgängerannäherung von rechts (Bild 2) und von links (Bild 3). Der Sichteindruck 5 s vor der Kollision wurde bewusst weggelassen, da der Fußgänger aufgrund der Entfernung zum Pkw nicht mehr erkennbar war.

Ergebnisse

Das Lichtprofil des Audi ist annähernd symmetrisch und länglich, während der BMW über ein klassisches asymmetrisches Scheinwerferprofil verfügt. Dies lässt sich u.a. aus den Erkennbarkeitsentfernungen in Abhängigkeit vom Fahrzeugmodell und Leuchtmittel ablesen, siehe exemplarisch Bild 4. Der Öffnungswinkel des Lichtkegels des BMW ist deutlich größer als beim Audi, die „Reichweite“ daher geringer, was aus den Hochfotos als Falschfarbenbilder entsprechend Bild 5 entnommen werden kann.

Von rechts kommende Fußgänger können im Audi-Scheinwerfer mit Standardleuchtmittel in 44 m erkannt werden, im BMW-Scheinwerfer bereits in einer Entfernung von 60 m. Welches Lichtprofil vorteilhaft ist, ist unter anderem von den Geschwindigkeiten, der Kleidung des Fußgängers und dem Kontaktpunkt am Pkw abhängig und kann nicht verallgemeinert werden. Generell sollte das Lichtprofil der Geschwindigkeit angepasst werden, was zu adaptiven Lichtsystemen führt.

Aus lichttechnischen Untersuchungen geht hervor, dass die Erkennbarkeit von Objekten außerhalb des Nahfeldes beim Halogenscheinwerfer durch „Streulicht“ erreicht wird, nicht durch

direkte Beleuchtung, wodurch ein am Oberkörper hell gekleideter Fußgänger frühzeitig erkannt werden kann. Dies wird als „Streulichteffekt“ bezeichnet.

Beim Leuchtmittelvergleich stellte sich heraus, dass die LED-Leuchte ohne Straßenzulassung nicht den Anforderungen der Scheinwerferkonstruktion entspricht. Das Scheinwerferprofil wird verfälscht und der Gegenverkehr geblendet. Bei der Glühlampe von Osram mit der größten Beleuchtungsstärke im Nahbereich zeigte sich eine gleich gute oder sogar schlechtere Fußgängererkennbarkeit im Vergleich zur Standardglühlampe. Dies könnte aufgrund der Überbeleuchtung des Nahbereichs und dem daraus resultierenden Adaptionsproblem des Auges resultieren. Die größte Erkennbarkeitsentfernung wurde mit einer Glühlampe von Philips festgestellt. Allerdings wird unabhängig vom Fahrzeug der linke Bereich des Lichtkegels erweitert. Es ist zu prüfen, ob der Zuwachs an Erkennbarkeitsentfernung durch eine größere Blendung erkauft wird.

Durch die Veränderung des Leuchtmittels im Halogenscheinwerfer ist es möglich, eine zusätzliche Erkennbarkeitsentfernung eines Fußgängers von maximal 8 m zu erreichen. Die untersuchten unterschiedlichen Scheinwerfertypen (Audi und BMW) zeigten Abweichungen von maximal 20 m in der Erkennbarkeitsentfernung.

Bei einer lichttechnischen Untersuchung muss somit der Scheinwerfertyp identisch gewählt werden, wenn möglich sollte auch das Leuchtmittel Beachtung finden. Der zentrale Punkt in der Bestimmung der Erkennbarkeitsentfernung bleibt jedoch die Berücksichtigung der Annäherungsgeschwindigkeiten, der Kleidung des Fußgängers und der örtlichen Gegebenheiten.

Je technologisch „hochwertiger“ das Scheinwerfersystem ist, desto breiter wird die beleuchtete Fläche im Nahbereich. Während Xenon- und insbesondere Halogenscheinwerfer im Audi A4 B8 über ein eher symmetrisches Scheinwerferprofil verfügen, ist die Ausrichtung des LED-Scheinwerferprofils deutlich asymmetrisch nach rechts gerichtet (Bild 6), sodass in einer Entfernung von 70 m zur Fahrzeugfront eine Beleuchtungsstärke von weniger als 1 lx auf der Fahrzeuglängsachse gemessen werden konnte (Bild 7).

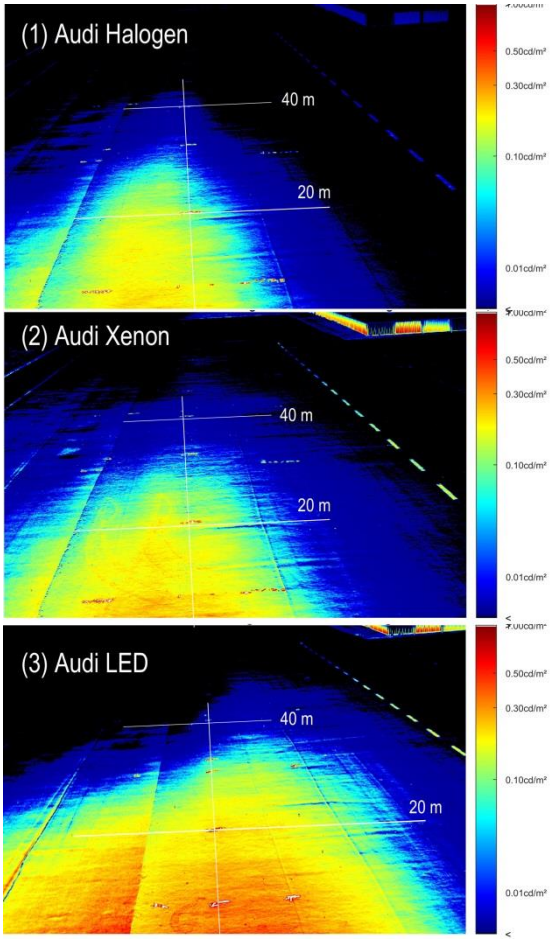

Bild 6: Log. Falschfarbenbilder der Profile der Halogen- (1), Xenon- (2) und LED-Scheinwerfer (3)

Durch den hohen Lichtstrom, die die Xenon- und LED-Scheinwerfer liefern können, ist trotz großem Öffnungswinkel des Lichtkegels eine große „Reichweite“ möglich. Von rechts kommende Fußgänger können mit Xenon-Scheinwerfern bereits in einer Entfernung von 70 m erkannt werden. Bei LED und Halogen liegen die Erkennbarkeitsgrenzen bei 56 beziehungsweise 44 m (Bild 8). Zur Vermeidung der Blendung des Gegenverkehrs ist die Fußgängererkennbarkeit auf der linken Fahrzeugseite bei Xenon und insbesondere LED-Scheinwerfern deutlich eingeschränkt. Können von links kommende Fußgänger mit Halogen bereits in

einer Entfernung von 42 m erkannt werden, so zeigen sich für Xenon und LED geringere Erkennbarkeitsentfernungen (38 beziehungsweise 27 m). Aus der Gegenüberstellung der Sichteindrücke aus dem Fahrzeug auf den Fußgänger und der Aufteilung der Erkennbarkeitsgrenze nach Oberkörper und Beinen wird deutlich, dass der Streulichtanteil der Scheinwerfer von Halogen über Xenon bis zu LED immer weiter verringert wurde (Bild 9 und Bild 10).

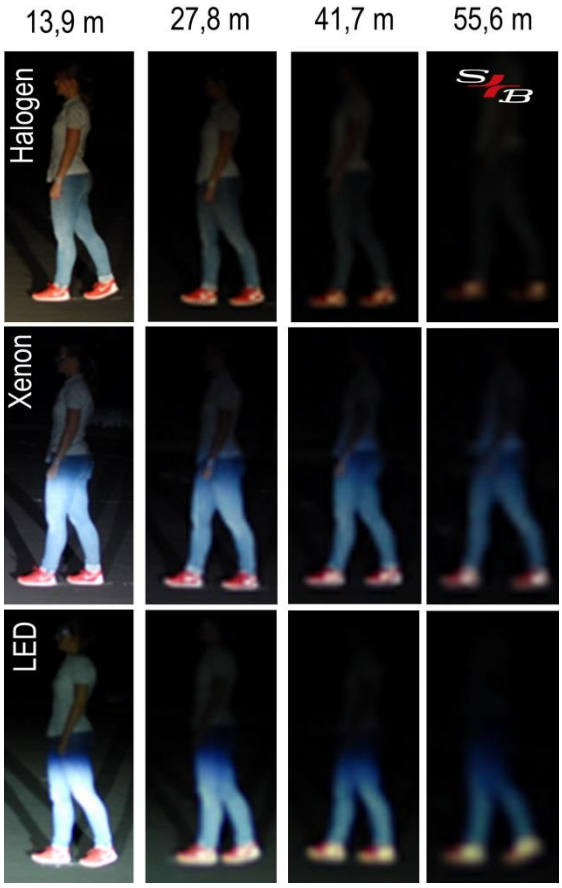

Bild 9: Sichtaufnahmen aus dem Audi mit Halogen-, Xenon- und LED-Scheinwerfern bei Fußgängerannäherung von rechts zwischen 4 und 1 s vor der Kollision

Dies führt zu einer schärfer definierten HDG und letztendlich zur Ausblendung des Oberkörpers bei der Fußgängererkennbarkeit, da die Erkennbarkeit hauptsächlich über die direkte Beleuchtung der Beine des Fußgängers bestimmt wird. Am Computer wurden die Absolutwerte der Leuchtdichten auf dem Oberkörper für jede Beleuchtungsart ermittelt und in die Bildzusammenstellung nach Bild 11 eingetragen. Von Halogen (0,07 cd/m²) über Xenon (0,04 cd/cd²) bis zu LED (0,02 cd/m²) nimmt die Leuchtdichte stetig ab, der Oberkörper wird demnach weniger stark angeleuchtet.

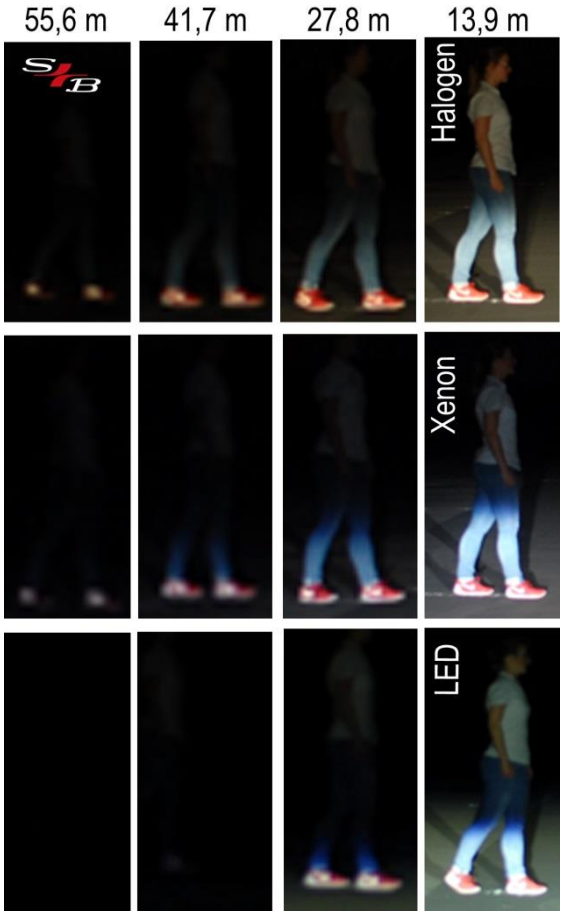

Bild 10: Sichtaufnahmen aus dem Audi mit Halogen-, Xenon- und LED-Scheinwerfern bei Fußgängerannäherung von links zwischen 4 und 1 s vor der Kollision

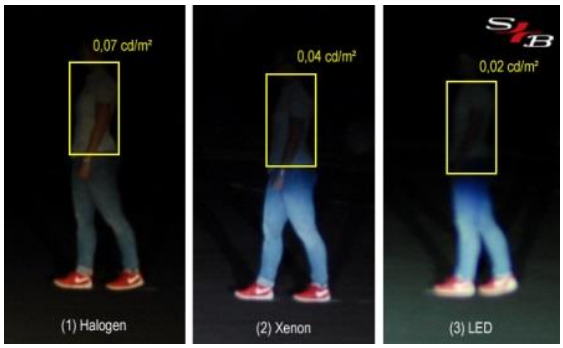

Bild 11: Leuchtdichte im Bereich des Oberkörpers in 30 m Entfernung bei Halogen (1), Xenon (2) und LED (3)

Reflektierende Kleidung und Straßenschilder lassen sich aber nach wie vor selbst mit den

streulichtarmen LED-Scheinwerfern problemlos in größerer Entfernung erkennen (Bild 12). Bei der Versuchsdurchführung wurde das Licht eines Mercedes E-Klasse T-Modell (S212) im Abblendmodus betrieben und die Sicht aus dem Fahrzeug auf einen Fußgänger mit entsprechender Warnjacke mit Reflektoren (Bild 12) in 10 m Abständen bis zu einer Entfernung von 120 m zur Fahrzeugfront entland der Längsachse der Scheinwerfer aufgenommen.

Bild 12: Warnjacke mit Reflektoren

Der Streulichteffekt trägt nur bei Halogenscheinwerfern signifikant zur Fußgängererkennbarkeit bei, sodass die Fußgängererkennbarkeit bei Xenon- und LED-Scheinwerfersystemen durch adaptive Lichtsysteme verbessert werden muss. Durch ein geschwindigkeitsabhängiges Lichtprofil und das blendfreie Fernlicht ist es mit diesen Scheinwerfern möglich, Fußgänger auch auf der linken Fahrzeugseite in größerer Entfernung erkennen zu können, sodass hier eine klare Überlegenheit zum herkömmlichen Halogenscheinwerfer vorliegt. Allerdings sollte berücksichtigt werden, dass blendfreies Fernlicht in der Regel innerorts nicht zum Einsatz kommt, Fußgängerunfälle hauptsächlich innerorts passieren und die Fußgängererkennbarkeit dann mit neuen Scheinwerfersystemen gegenüber Halogenscheinwerfern keinen Vorteil bietet.

Die Untersuchung der neuen Scheinwerfersysteme mit Xenon und LED zeigt, dass aus technischer Sicht somit adaptive Systeme erforderlich sind, um innerorts eine bessere Fußgängererkennbarkeit zu gewährleisten. Durch die Lichtassistenten wird es in Zukunft notwendig sein, in die Fahrzeugelektronik einzugreifen, um die dynamische Lichtveränderung bei der Fahrzeugannäherung im Rahmen einer LTU nachstellen zu können.

Detailliertere Informationen zu den durchgeführten lichttechnischen Untersuchungen und deren Auswertungen finden sich in der Veröffentlichung von Kortmann und Hoger [11,12] im VKU.

Literaturhinweis

[1] ADAC (Beitrag 18.10.2016).

[2] ADAC, LED-Lichtanlagen von sechs SUVs im Test, www.adac.de (2016)

[3] Deutscher Verkehrssicherheitsrat, Getötete bei Verkehrsunfällen, www.dvr.de (2016)

[4] Deutscher Verkehrssicherheitsrat, Das Unfallgeschehen bei Nacht, www.dvr.de (2016)

[5] ADAC, Finger weg: Diese Glühlampen brennen zu früh aus, www.focus.de (2013)

[6] M.Berek, Zum physiologischen Grundgesetz der Wahrnehmung von Lichtreizen, Instrumentenkunde 63, 297 (1943)

[7] W.Adrian, Die Unterschiedsempfindlichkeit des menschlichen Auges und die Möglichkeit ihrer Berechnung, Lichttechnik 21, 2 (1943)

[8] K.Schmedding, M.Becke, Das SBU-Diagramm und die Bestimmung von Erkennbarkeitsentfernungen mit Hilfe des SI-Diagramms, VKU 28 (1990)

[9] D.Wüller, Digitale Standard-Spiegelreflexkameras als Leuchtdichtemessgerät im mesopischen Bereich, 18. EVU Conference, Hinckley

[10] T.Hoger, Lichttechnische Untersuchungen mit einer Standard-Digitalkamera, VKU 52 (02/2016)

[11] A.Kortmann, T.Hoger, Fußgängererkennbarkeit mit Halogen, Xenon und LED: “der Streulichteffekt“ (Teil 1), VKU 1/2017

[12] A.Kortmann, T.Hoger, Fußgängererkennbarkeit mit Halogen, Xenon und LED: “der Streulichteffekt“ (Teil 2), VKU 3/2017

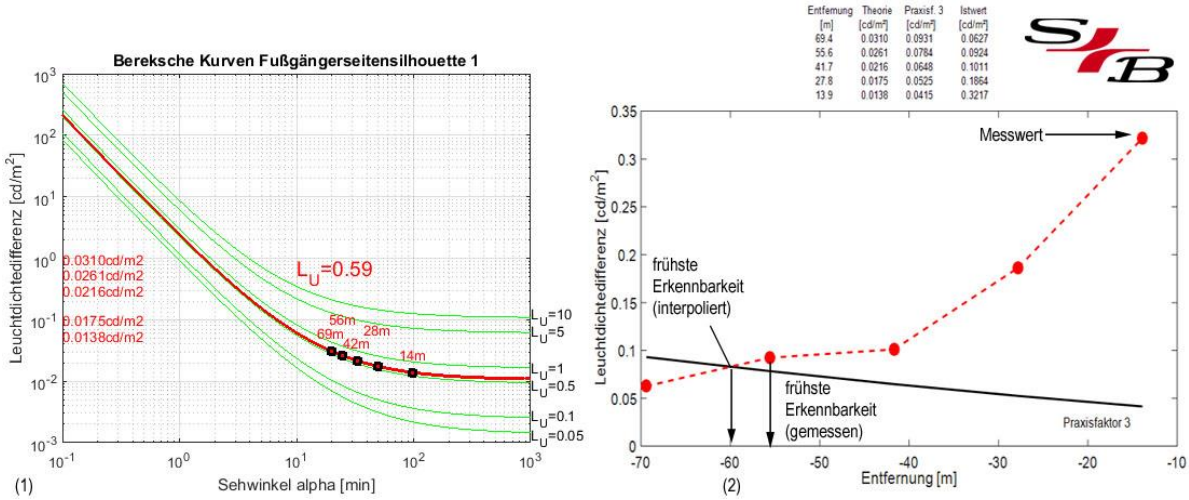

Bild 1: Bereksche Kurven (1) und das SI-Diagramm (2) zur Auswertung der LTU

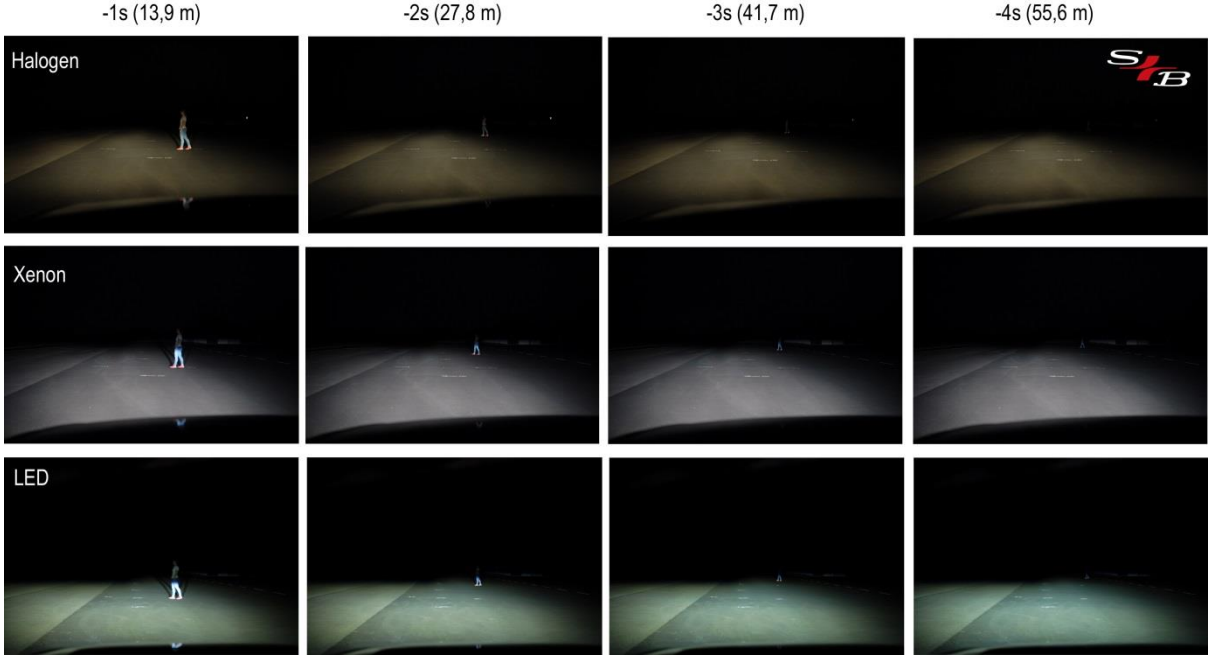

Bild 2: Sichtaufnahmen aus dem Audi mit Halogen-, Xenon- und LED-Scheinwerfern bei Fußgängerannäherung von rechts zwischen 4 und 1 s vor der Kollision

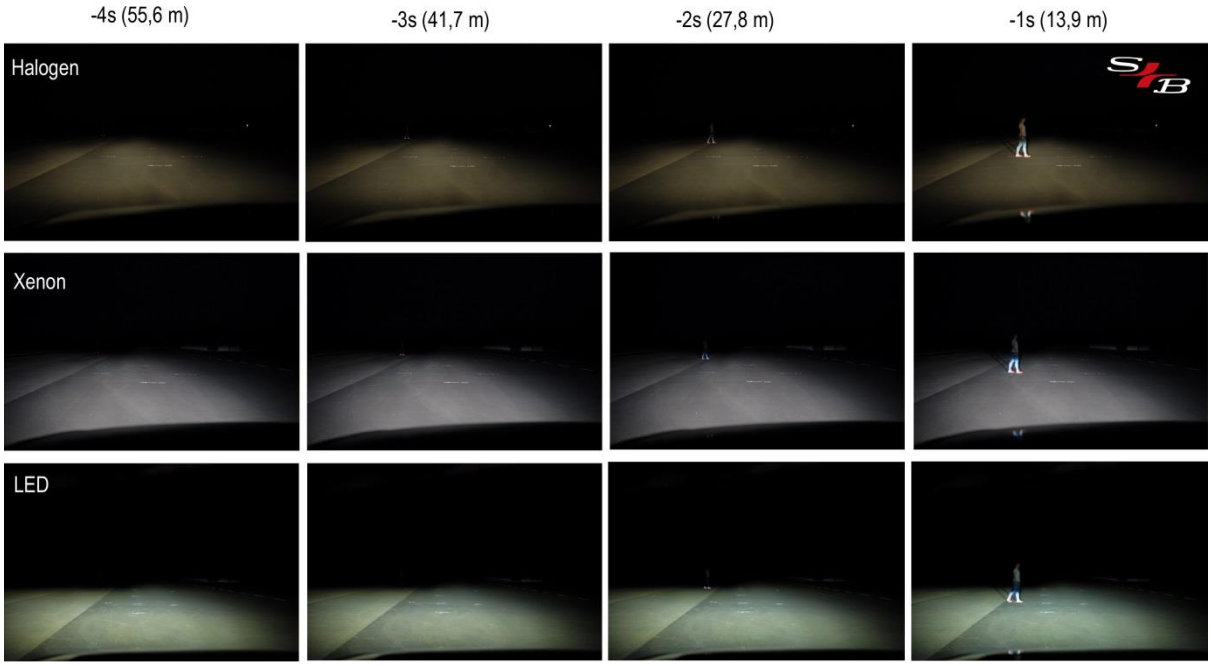

Bild 3: Sichtaufnahmen aus dem Audi mit Halogen-, Xenon- und LED-Scheinwerfern bei Fußgängerannäherung von links zwischen 4 und 1 s vor der Kollision

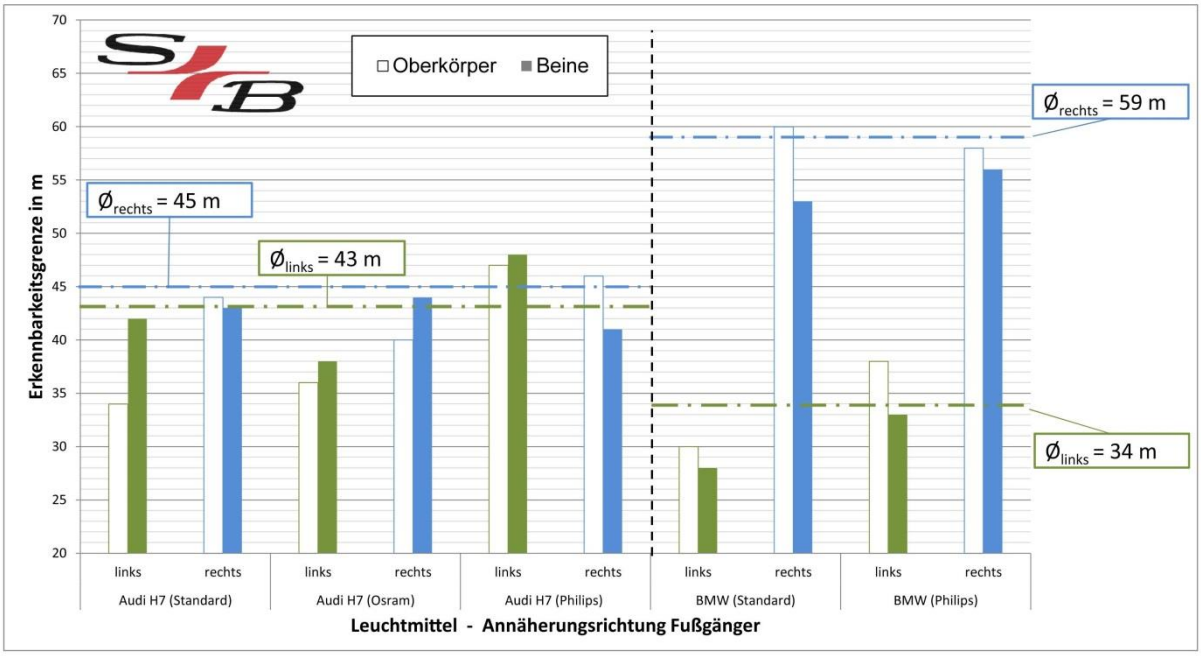

Bild 4: Fußgängererkennbarkeit in Abhängigkeit vom Fahrzeugmodell und Leuchtmittel

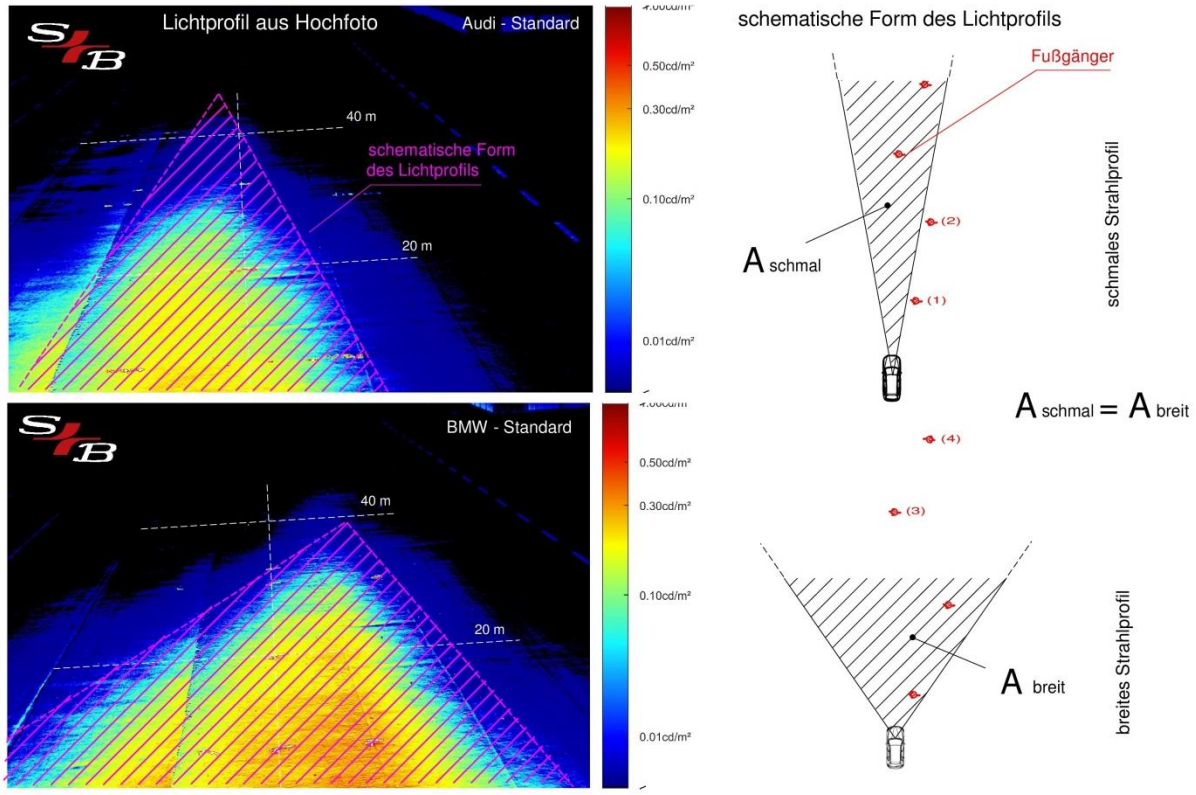

Bild 5: Zusammenhang zwischen schematischer Lichtprofilform und der Fußgängererkennbarkeit

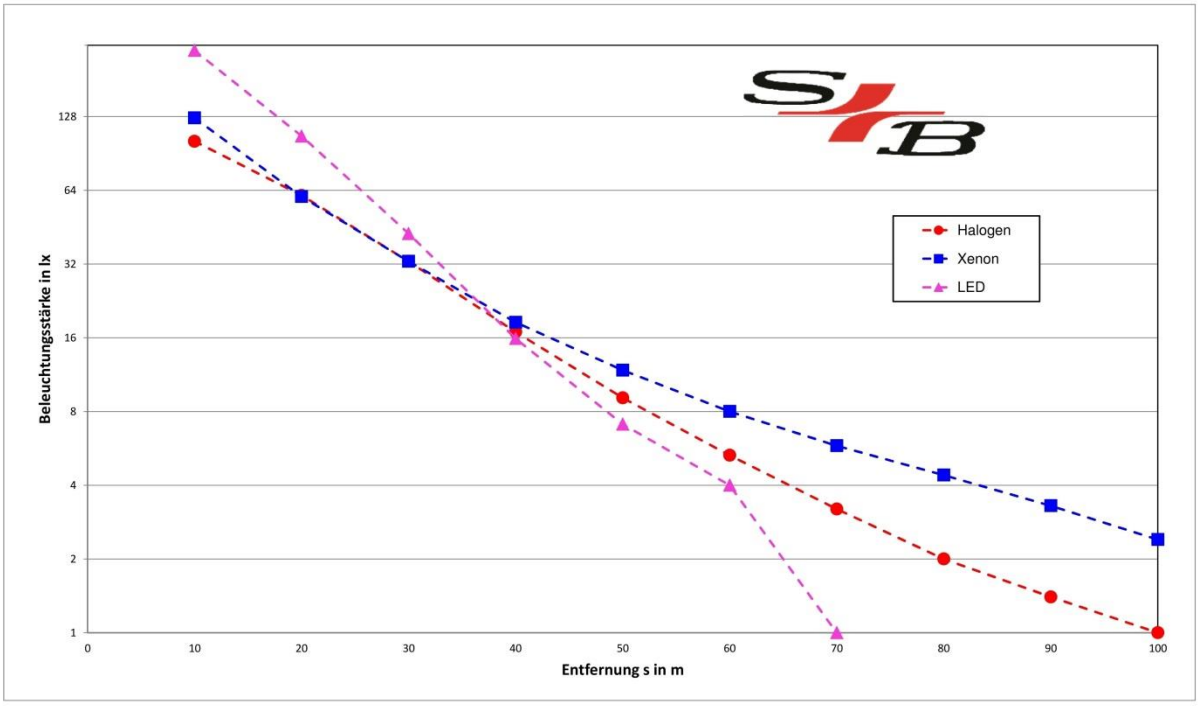

Bild 7: Verlauf der Beleuchtungsstärke mit Halogen, Xenon und LED

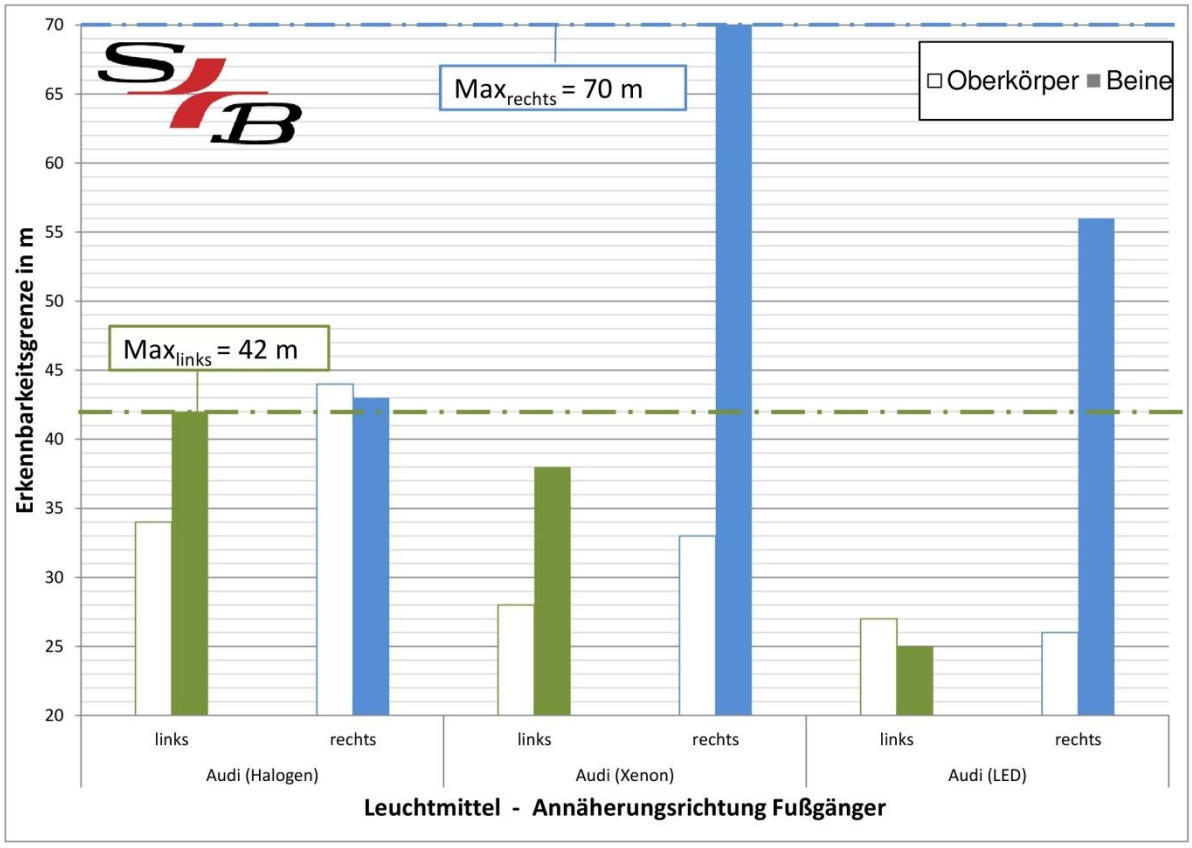

Bild 8: Fußgängererkennbarkeit in Abhängigkeit vom Leuchtmittel (Audi)

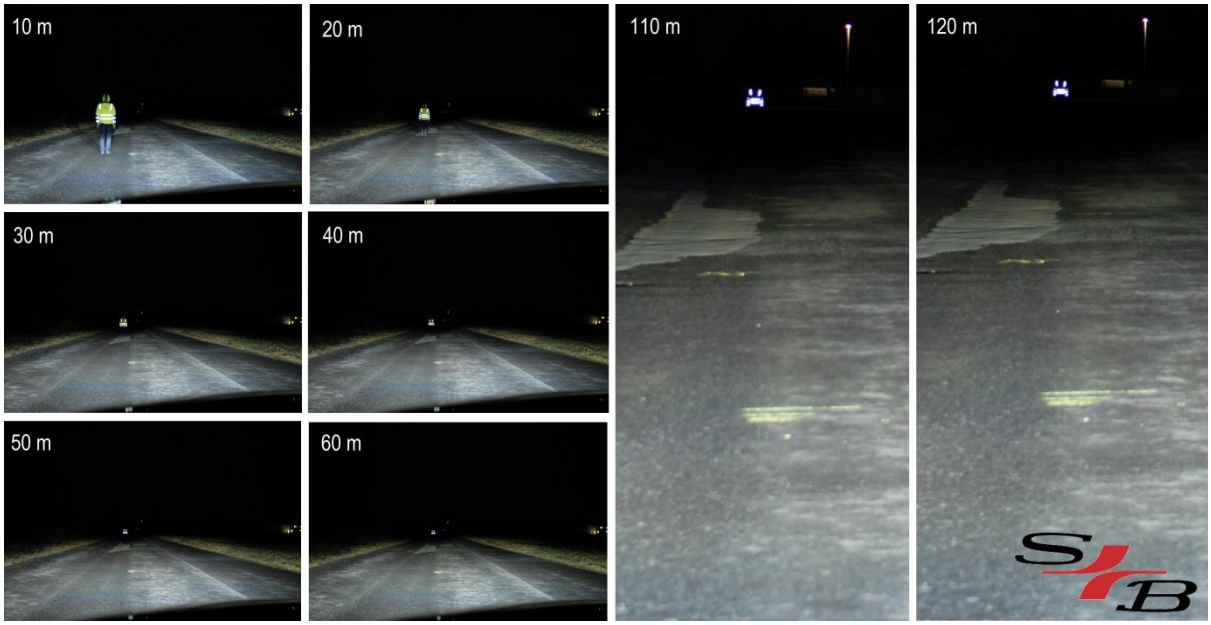

Bild 12: Sichteindruck aus dem Mercedes auf den Fußgänger – LED-Scheinwerfer im Abblendmodus betrieben